



















れる。

【0018】本発明の第10の側面によれば、n型窒化物半導体層とp型窒化物半導体層との間にインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する少なくとも1層の井戸層を有する量子井戸構造の活性層を備え、該井戸層は、70オングストローム以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0019】本発明の第11の側面によれば、第1の主面および第2の主面を有し、かつインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層を備え、該第1の主面上にn型Ga<sub>n</sub>N層が形成され、該第2の主面上にアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体層が形成され、該p型窒化物半導体上にp型Ga<sub>n</sub>N層が形成されていることを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0020】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。なお、全図に渡り、しばしば、同様の部分は、同一符号をもって示されている。

【0021】図1は、本発明の第1の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図である。

【0022】図1に示す窒化物半導体発光素子10は、活性層15、並びに活性層15を両側で挟んでいる第1のn型クラッド層14およびp型クラッド層16からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層12およびn型コンタクト層13を介して、基板11上に設けられている。

【0023】活性層15は、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する。インジウムとガリウムを含む窒化物半導体は、 $\text{In}_m\text{Al}_n\text{Ga}_{1-m-n}\text{N}$ （ここで、 $0 < m < 1$ 、 $0 \leq n < 1$ 、 $m+n=1$ ）で示すことができる。最も好ましくは、活性層15は、式 $\text{In}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ （ここで、 $0 < m < 1$ ）で示される窒化物半導体を包含する。インジウムの比率、すなわち各式におけるmの値を変えることにより、紫外から赤色までの領域の発光光を得るようにバンドギャップを変えることができる。なお、以下の記載において、式 $\text{In}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ （ここで、 $0 < m < 1$ ）または同等の式をもって表される窒化物半導体を単にInGa<sub>n</sub>Nと表示することがある。

【0024】活性層15は、量子井戸構造のものである。活性層15を量子井戸構造にすることにより、LED素子であれ、LD素子であれ、歪量子井戸効果、エキシトン発光効果等により、高出力の発光素子が実現できる。

【0025】本発明において、量子井戸構造とは、活性層を構成する窒化物半導体（InGa<sub>n</sub>N）の量子準位間発光を生じさせる構造をいい、単一量子井戸構造および多重量子井戸構造の双方を含む概念である。

【0026】単一量子井戸構造とは、井戸層が単一組成の窒化物半導体の一層からなる構造を指す。すなわち、単一量子井戸構造の活性層は、単一の井戸層だけで構成され、この活性層（すなわち、例えば、単一組成のInGa<sub>n</sub>Nからなる）を両側で挟持する2つのクラッド層が障壁層を構成することとなる。

【0027】また、多重量子井戸構造とは、井戸層と障壁層とを順次積層した多層膜構造を指す。多重量子井戸構造の最少積層構造は、1つの障壁層とこの障壁層の両側に設けられた（2つの）井戸層とからなる3層構造または1つの井戸層とその両側に設けられた（2つの）障壁層とからなる3層構造であり得る。多重量子井戸構造において、両側の2つ最外層は、それぞれ井戸層または障壁層により構成される。活性層の2つ最外層がそれぞれ井戸層によって構成される多重量子井戸構造の場合には、当該活性層を両側で挟持する2つのクラッド層が障壁層を構成する。この多重量子井戸構造の活性層において、井戸層および障壁層は、両者をインジウムとガリウムを含む窒化物半導体（好ましくはInGa<sub>n</sub>N）で形成することができる（ただし、両者の組成は異なる）が、井戸層をインジウムとガリウムを含む窒化物半導体（好ましくは、InGa<sub>n</sub>N）で形成し、障壁層を他の窒化物半導体で、例えばInNやGa<sub>n</sub>Nで形成することもできる。すなわち、この多重量子井戸構造の活性層も、インジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する。活性層15は、単一量子井戸構造の場合では井戸層を100オングストローム以下の厚さに形成し、多重量子井戸構造の場合では各井戸層を100オングストローム以下の厚さにかつ各障壁層を150オングストローム以下の厚さに形成することが好ましい。いずれの場合でも、井戸層は70オングストローム以下の厚さを有することがさらに好ましく、50オングストローム以下の厚さを有することが最も好ましい。活性層中の障壁層は、100オングストローム以下の厚さに形成することがさらに好ましい。多重量子井戸構造の活性層は、200オングストローム以上の厚さを有することが特に好ましく、通常、0.5μmまでの厚さを有し得る。

【0028】単一量子井戸構造、多重量子井戸構造いずれの活性層15においても、活性層はn型、p型いずれでもよいが、特にノンドープ（不純物無添加）とすることにより半値幅の狭いバンド間発光、励起子発光、あるいは量子井戸準位発光が得られるので、特に好ましい。

【0029】活性層15にドナー不純物および／またはアクセプター不純物をドーピングする場合、当該不純物をドーピングした活性層の結晶性がノンドープの活性層の結晶性と実質的に同じであれば、ドナー不純物をドーピングした活性層は、ノンドープの活性層よりもバンド間発光強度がさらに強くなり得、他方、アクセプター不純物をドーピングした活性層は、本来のバンド間発光のピーク波長よりも約0.5eV低エネルギー側にシフトした発光ピーク波

長を示すが、半値幅は広くなる傾向にある。また、アクセプター不純物とドナー不純物の双方をドーピングすると、アクセプター不純物のみドーピングした活性層の発光強度をさらに増大させることができる。特にアクセプター不純物をドーピングした活性層を得ようとする場合、活性層の導電性はSi等のドナー不純物をもドーピングしてn型とすることが好ましい。

【0030】しかしながら、本発明においては、活性層はバンド間発光により強力に発光するのが理想であるので、活性層15には不純物をドーピングしないことが最も好ましい。また、ノンドーピングの活性層を有する発光素子は、不純物をドーピングした活性層を有する発光素子よりもVf(順方向電圧)を低くすることができる。

【0031】活性層15の第1の主面に接して設けられている第1のn型クラッド層14は、インジウムとガリウムとを含むn型の窒化物半導体で形成される。InとGaを含む窒化物半導体は、結晶が比較的柔らかいので、いわばバッファ層として作用し、以下にも述べるように、活性層15およびそれ自体に、あるいはその上に形成され得る他の窒化物半導体層にクラックを生じにくくさせてそれらの結晶性を悪化させず、もって発光素子の発光出力を向上させる。第1のn型クラッド層14は、n型 $\text{In}_j\text{Ga}_{1-j}\text{N}$  ( $0 < j < 1$ ) で形成することが望ましい。この $\text{In}_j\text{Ga}_{1-j}\text{N}$ において、jの値は、 $0 < j \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましい。一般にInGa<sub>0.5</sub>Nは、Inの比率を多くするに従い、結晶性が次第に悪くなる傾向にあり、n型クラッド層として当該発光素子に実用的に発光出力の高い発光を行わせるためには、j値が0.5以下であることが好ましいのである。j値は、さらに好ましくは $0 < j \leq 0.3$ 、最も好ましくは $0 < j \leq 0.2$ の範囲内にある。

【0032】また、第1のn型クラッド層14のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。n型クラッド層14中のキャリア濃度が $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ よりも少ないと活性層15への電子注入効率が低下し、発光出力が低下する傾向にあり、他方n型クラッド層14中のキャリア濃度が $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ よりも大きいと第1のn型クラッド層の結晶性が悪くなり、発光出力が低下する傾向にあるからである。

【0033】第1のn型クラッド層14は、その厚さに特に制限はないが、活性層15と第1のn型クラッド層14とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましい。InとGaとを含む窒化物半導体層(活性層+第1のn型クラッド層)の総厚が300オングストロームよりも薄いと、活性層15および第1のn型クラッド層14に、さらには第1のn型クラッド層に接して設けられる別の窒化物半導体層に、格子定数不整、熱膨張率の差等によりそれらの界面に存在し得る歪応力によって、クラックが生じやすくなるからであ

る。上にも述べたように、InとGaを含む窒化物半導体は、その結晶が比較的柔らかいので、この応力を緩和させるのに有益であるが、その総厚を300オングストローム以上の厚さに形成することにより、当該応力をより一層緩和させるようになる。この総厚は、1 $\mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

【0034】活性層15の第2の主面に接して形成されているp型クラッド層16は、p型窒化物半導体で形成される。そのような窒化物半導体は、式 $\text{In}_s\text{Al}_t\text{Ga}_{1-s-t}\text{N}$  (ここで、 $0 \leq s$ 、 $0 \leq t$ 、 $s+t \leq 1$ )で示すことができる。

【0035】基板11は、サファイア(C面、R面、A面を含む)、SiC(6H-SiC、4H-SiCを含む)、Si、ZnO、GaAs、スピネル( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 、特にその(111)面)、GaN、窒化物半導体と格子定数の近い酸化物単結晶等で形成することができるが、一般的には、サファイア、スピネル、GaNまたはSiCが使用される。

【0036】基板11上に形成されているバッファ層12は、基板11とその上に形成される窒化物半導体層との格子不整合を緩和するために通常形成されるものであり、例えばGaN、AlN、GaAlN等により数百オングストロームの厚さに形成される。なお、基板11がその上に形成される窒化物半導体と格子定数が近いSiCやZnOのような材料で形成されている場合、また基板11がその上に形成される窒化物半導体と格子整合している場合には、このバッファ層12は形成されないこともある。

【0037】バッファ層12上には、第1のn型クラッド層14にも接してn型コンタクト層13が形成されている。このn型コンタクト層13は、GaN、AlGa<sub>0.5</sub>N等で形成することが好ましい。

【0038】基板11に所定の各半導体層を形成した後、エッチングにより露出されたn型コンタクト層の表面上には、負電極18が形成されている。

【0039】n型コンタクト層13は、GaNで形成すると、負電極18とのより一層好ましいオーミックコンタクトが達成され、発光素子の順方向電圧(Vf)をより一層低下させる。また、GaNはその結晶性が他の三元混晶、四元混晶の窒化物半導体に比べて優れているため、その上に成長させる第1のn型クラッド層14等の窒化物半導体層の結晶性を向上させることができるので、発光素子の発光出力を向上させる。

【0040】また、n型コンタクト層13のキャリア濃度は、負電極18との好ましいオーミック接触の達成およびその結果としてのVfの低下並びに発光出力の低下防止の観点から、 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。

【0041】負電極18は、n型コンタクト層13との好ましいオーミックコンタクトの達成の観点から、チタ

ン(Ti)と金(Au)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金、またはTiとアルミニウム(Al)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金で形成することが最も好ましい。この場合において、負電極18は、n型Ga<sub>1-a</sub>Nコンタクト層13に直接接して設けられたチタン層とその上に形成されたアルミニウム層との2層構造として形成することが特に好ましい。

【0042】p型クラッド層16上には、p型コンタクト層17が形成され、その上には、正電極19が形成されている。p型コンタクト層17は、Ga<sub>1-a</sub>N、AlGa<sub>1-a</sub>N等で形成することが好ましい。特にp型コンタクト層17をGa<sub>1-a</sub>Nで形成すると、正電極19とのより一層好ましいオーミックコンタクトが達成され、発光素子のV<sub>f</sub>を低下させることができる。

【0043】正電極19との好ましいオーミック接触の達成およびその結果としてのV<sub>f</sub>の低下並びに発光出力の低下防止の観点から、p型コンタクト層17のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$  の範囲内にあることが望ましい。

【0044】正電極19は、p型コンタクト層17との好ましいオーミックコンタクトの達成の観点から、ニッケル(Ni)と金(Au)とを含む金属材料、例えばそれらの積層構造または合金で形成することが最も好ましい。この場合において、正電極19は、p型Ga<sub>1-a</sub>Nコンタクト層17に直接接して設けられたニッケル層とその上に形成された金層との2層構造として形成することが特に好ましい。

【0045】図2は、本発明の第1の側面による窒化物半導体発光素子の別の態様を示す。図2に示す発光素子20は、第1のn型クラッド層14とn型コンタクト層13との間に、第2のn型クラッド層21を設けた以外は、図1に示す窒化物半導体素子と同様の構造を有する。

【0046】この発光素子20において、図1に示す発光素子構造に付加して設けられている第2のn型クラッド層21は、アルミニウムとガリウムを含むn型窒化物半導体で形成されている。このような第2のn型クラッド層21を設けることによって、第1のn型クラッド層14との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0047】この第2のn型クラッド層21は、好ましくは、n型Al<sub>a</sub>Ga<sub>1-a</sub>N(ここで、 $0 < a < 1$ )で形成される。この場合において、aの値は、 $0 < a \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。AlGa<sub>1-a</sub>Nはその結晶が比較的硬く、0.6より大きいと、第1のn型クラッド層14の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。a値は、 $0 < a \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。なお、本明細書において、

Al<sub>a</sub>Ga<sub>1-a</sub>Nまたは同等の式をもって表される窒化物半導体を単にAlGa<sub>1-a</sub>Nと表示することがある。また、第2のn型クラッド層21のキャリア濃度は、 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ よりも低いと、AlGa<sub>1-a</sub>Nの抵抗率が高くなるので、発光素子のV<sub>f</sub>が高くなり、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ よりも高いとAlGa<sub>1-a</sub>Nの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。第2のn型クラッド層21は、通常、50オングストローム $\sim 0.5 \mu\text{m}$ の厚さをもって形成することができる。

【0048】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、n型クラッド層14、活性層15、p型クラッド層16、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものである。

【0049】図3は、本発明の第2の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図である。

【0050】図3に示す窒化物半導体発光素子30は、活性層15、並びに活性層15を両側で挟んでいるn型クラッド層34および第1のp型クラッド層36からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、図1に示す構造と同様、バッファ層12およびn型コンタクト層13を介して、基板11上に設けられている。活性層15の第2の主面に接して設けられている第1のp型クラッド層36は、インジウムとガリウムとを含むp型の窒化物半導体で形成される。InとGaを含む窒化物半導体は、結晶が比較的柔らかいので、いわばバッファ層として作用し、以下にも述べるように活性層15およびそれ自体に、あるいはその上に形成され得る他の窒化物半導体層にクラックを生じにくくさせてそれらの結晶性を悪化させず、もって発光素子の発光出力を向上させる。第1のp型クラッド層36は、p型In<sub>k</sub>Ga<sub>1-k</sub>N( $0 < k < 1$ )で形成することが望ましい。このIn<sub>k</sub>Ga<sub>1-k</sub>Nにおいて、kの値は、 $0 < k \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましい。一般にInGa<sub>1-k</sub>Nは、Inの比率を多くするに従い、結晶性が次第に悪くなる傾向にあり、p型クラッド層として当該発光素子に実用的に発光出力の高い発光を行わせるためには、k値が0.5以下であることが好ましいのである。k値は、さらに好ましくは $0 < k \leq 0.3$ 、最も好ましくは $0 < k \leq 0.2$ の範囲内にある。

【0051】また、第1のp型クラッド層36のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。第1のp型クラッド層36中のキャリア濃度が $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ よりも少ないと活性層15への電子注入効率が低下し、発光出力が低下する傾向にあり、他方p型クラッド層36中のキャリ

ア濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ よりも大きいと第1のp型クラッド層の結晶性が悪くなり、発光出力が低下する傾向にあるからである。第1のp型クラッド層36は、図1に示す構造におけるp型クラッド層16に関して述べた方法により好ましく得られる。

【0052】第1のp型クラッド層36は、その厚さに特に制限はないが、活性層15と第1のp型クラッド層36とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましい。InとGaを含む窒化物半導体層（活性層+第1のp型クラッド層）の総厚が300オングストロームよりも薄いと、活性層15および第1のp型クラッド層36に、さらには第1のp型クラッド層に接して設けられる別の窒化物半導体層に、格子定数不整、熱膨張率の差等によりそれらの界面に存在し得る歪応力によって、クラックが生じやすくなるからである。上にも述べたように、InとGaを含む窒化物半導体は、その結晶が比較的柔らかいので、この応力を緩和させるのに有益であるが、その総厚を300オングストローム以上の厚さに形成することにより、当該応力をより一層緩和させるようになる。この総厚は、 $1 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

【0053】活性層15の第1の主面に接して形成されているn型クラッド層34は、n型窒化物半導体で形成される。そのような窒化物半導体は、式 $\text{In}_u\text{Al}_v\text{Ga}_{1-u-v}\text{N}$ （ここで、 $0 \leq u$ 、 $0 \leq v$ 、 $u+v \leq 1$ ）で示すことができる。

【0054】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、活性層15、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものである。

【0055】図4は、本発明の第2の側面による窒化物半導体発光素子の別の態様を示す。図4に示す発光素子40は、第1のp型クラッド層36とp型コンタクト層17との間に、第2のp型クラッド層41を設けた以外は、図3に示す窒化物半導体素子と同様の構造を有する。

【0056】この発光素子40において、図3に示す発光素子構造に付加して設けられている第2のp型クラッド層41は、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成されている。このような第2のp型クラッド層41を設けることによって、第1のp型クラッド層36との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0057】この第2のp型クラッド層41は、好ましくは、 $\text{p型Al}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ （ここで、 $0 < b < 1$ ）で形成される。この場合において、bの値は、 $0 < b \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。AlGaInはその結晶が比較的硬く、0.6より大きいと、第1のp型クラッド層36の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾

向にあるからである。b値は、 $0 < b \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。

【0058】また、第2のp型クラッド層41のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ よりも低いと、活性層15への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ よりも高いとAlGaInの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。第2のp型クラッド層41は、通常、50オングストローム $\sim 0.5 \mu\text{m}$ の厚さをもって形成することができる。

【0059】基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、活性層15、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に関して説明した通りのものであり、n型クラッド層34および第1のp型クラッド層36は、図3に関して説明した通りのものである。

【0060】図5は、本発明の第3の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図である。

【0061】図5に示す窒化物半導体発光素子50は、活性層15、並びに活性層15をその両側で挟む第1のn型クラッド層54を含むn型半導体層501および第2のp型クラッド層41を含むp型半導体層502からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、図1に示す構造と同様、バッファ層12およびn型コンタクト層13を介して、基板11上に設けられている。図5では、n型半導体層501は、第1のn型クラッド層54により構成されている。

【0062】この発光素子50は、図1に示す発光素子10におけるn型クラッド層構造と図4に示すp型クラッド層構造を組み合わせた半導体積層構造を有するものといえるが、この特別の場合においては、第1のn型クラッド層54は、図1に示す第1のn型クラッド層14を構成するインジウムとガリウムを含む窒化物半導体ばかりでなく、GaInによってもこれを形成でき、同様の効果を奏することがわかった。また、この場合には、第1のp型クラッド層56は、図1に示す発光素子10におけるp型クラッド層16と同様、いずれのp型窒化物半導体で形成してもよいこともわかった。このような半導体積層構造によっても、発光素子は同様の優れた特性を示す。

【0063】より詳しく説明すると、第1のn型クラッド層54は、アルミニウムを含まないn型窒化物半導体により形成される。この第1のn型クラッド層54は、 $\text{n型In}_w\text{Ga}_{1-w}\text{N}$ （ここで、 $0 \leq w < 1$ ）で形成することが好ましい。すなわち、この第1のn型クラッド層54は、図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明したn型窒化物半導体で形

成することもできるし、n型Ga<sub>0.9</sub>Nで形成することができる。図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明した理由と同様の理由から、wの値は、 $0 \leq w \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは $0 < w \leq 0.3$ 、最も好ましくは $0 < w \leq 0.2$ の範囲内にある。第1のn型クラッド層54のキャリア濃度も、同様の理由から、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。第1のn型クラッド層54も、その厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15と第1のn型クラッド層54とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、1 $\mu\text{m}$ 以下の厚さを有し得る。

【0064】図5に示す発光素子50において、活性層の第2の主面に接して形成されている第1のp型クラッド層56は、いずれのp型窒化物半導体で形成してもよいが、アルミニウムを含まないp型窒化物半導体で形成することが好ましい。より具体的には、第1のp型クラッド層56は、p型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ （ここで、 $0 \leq x < 1$ ）で形成することが望ましい。図3の発光素子30における第1のp型クラッド層36に関して説明した理由と同様の理由から、x値は、 $0 \leq x \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは $0 \leq x \leq 0.3$ の範囲内、最も好ましくは $0 \leq x \leq 0.2$ の範囲内にある。この第1のp型クラッド層56も同様にGa<sub>0.9</sub>Nにより形成してもいわばバッファ層として同様に作用する。また、この第1のp型クラッド層56のキャリア濃度も、同様の理由から、 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。さらに、第1のクラッド層56の厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15との合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、1 $\mu\text{m}$ 以下の厚さが好ましい。なお、この第1のp型クラッド層56は省略してもよいが、これを形成すれば、第1のp型クラッド層がバッファ層として作用するのでクラックが生じにくくなり、その発光素子は、より一層優れた特性を示すことは明らかであろう。

【0065】第2のp型クラッド層41は、図4に示す発光素子40における第2のクラッド層41について説明した通りのものである。

【0066】また、基板11、バッファ層12、n型コンタクト層13、p型コンタクト層17、負電極18および正電極19は、図1に示す発光素子10に関して説明した通りのものである。

【0067】図6は、本発明の第3の側面による半導体発光素子の別の形態の構造を示す概略断面図である。この発光素子60は、n型コンタクト層13と第1のn型クラッド層54との間に、第2のn型クラッド層21が追加形成されている以外は、図5に示す発光素子50と同様の構造を有する。この第2のn型クラッド層21

は、図2に示す発光素子20における第2のn型クラッド層21について説明した通りのものである。なお、第1のp型クラッド層56は、省略するよりも、これを設けた方が好ましいことも、図5に示す発光素子50の場合と同様である。以上、本発明の第1の側面ないし第3の側面による窒化物半導体発光素子について説明したが、これら発光素子の構造は、LED素子にも、LD素子にも適用できることはいうまでもない。LDの構造は、例えば図7に斜視図として示す構造をとる。図7において、基板11上の半導体層71は、上記バッファ層12、n型コンタクト層13、第1のn型クラッド層および形成された場合の第2のn型層からなる半導体層である。活性層15上に形成されている半導体層72は、上記形成された場合の第1のクラッド層および第2のクラッド層並びにp型コンタクト17層からなる半導体層である。印加された電流は、活性層15において、正電極19に対応する領域15aに集中して流れる。

【0068】なお、LD素子の場合には、上記発光素子10ないし60のいずれかの第1のn型クラッド層とn型コンタクト層13との間、第2のn型クラッド層が形成されている場合には、その第2のn型クラッド層とn型コンタクト層13との間に、および／または上記発光素子10ないし60のいずれかの第1のp型クラッド層とp型コンタクト層17との間、第2のp型クラッド層が形成されている場合には、その第2のp型クラッド層とn型コンタクト層13との間に、互いに組成の異なる少なくとも2種類の窒化物半導体層を積層してなる多層膜を光反射膜として形成することもできる。

【0069】図6に示す発光素子構造に上記多層光反射膜を適用した例を図8に示す。図8に示す窒化物半導体発光素子80は、n型コンタクト層13と第2のn型クラッド層21との間に第1の多層光反射膜（n型）81を、また第2のp型クラッド層41とp型コンタクト層17との間に第2の多層光反射膜（p型）82を備える。

【0070】第1の多層膜81および第2の多層膜82は、いずれも、互いに組成の異なる窒化物半導体、すなわち互いに屈折率の異なる窒化物半導体を、各層を例えば $\lambda/4n$ （ここで、 $\lambda$ は活性層15からの発光光の波長、 $n$ は屈折率）で算出される厚さで交互に2層以上積層して形成されるものであり、活性層15からの発光光をそれら膜により反射できるように設計されている。正電極19を図7に示すような形状のストライプ電極として例えば幅10 $\mu\text{m}$ 以下に形成し、レーザ発振を行わせると、活性層15の発光光を多層膜反射層により活性層15内に閉じこめることがより一層容易となり得るので、容易にレーザ発振できる。また、LEDモードにおいても、多層膜反射層により発光光の漏れが抑えられ、外部量子効率が向上する。

【0071】多層光反射膜81および82には、それぞれ

れ、ドナー不純物およびアクセプター不純物がドーピングされて所定の導電型となっている。

【0072】なお、図8に示す構造においては、第1の多層光反射膜81は、n型コンタクト層13と第2のn型クラッド層21との間に形成されているが、その代りに、これをn型コンタクト層13内に形成することもできる。同様に、第2の多層光反射膜82をp型コンタクト層17内に形成してもよい。多層光反射膜は、コンタクト層内に形成しても、活性層16からの発光光を同様に閉じ込めることができる。また、第1の多層光反射膜81および第2の多層光反射膜82のいずれかを省略してもよい。

【0073】また、図8に示すように、サファイアのような絶縁性材料を基板11としてレーザ素子を作製する場合、レーザ素子の構造はフリップチップ方式となる。すなわち、基板11の同一面側に、より具体的には、基板11の窒化物半導体層形成側に正、負両電極19、18を形成する構造となる。この場合、図8に示すように、n型層側に形成する第1の多層光反射膜81は、負電極18が形成されているn型コンタクト層13の水平面よりもp層側すなわち上方に位置して形成することが好ましい。第1の多層光反射膜81をn型コンタクト層13の水平面よりも基板11側に形成すると、第2のn型クラッド層21とn型コンタクト層13との屈折率の差が小さいために、活性層15からの発光光が、活性層15よりも下側に位置するn型コンタクト層13中に広がってしまい、十分な光閉じこめができない場合があるからである。これは、サファイアのような絶縁性基板を使用した窒化物半導体レーザに特有の現象である。

【0074】さて、各多層光反射膜81、82を構成する2種類の窒化物半導体は、少なくとも一方がインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体（例えば $\text{In}_q\text{Ga}_{1-q}\text{N}$ （ここで、 $0 < q < 1$ ））または $\text{GaN}$ であることが好ましい。なぜなら単一層を積層して多層光反射膜とする場合、その単一層の一方を $\text{InGaN}$ または $\text{GaN}$ で形成することにより、その $\text{InGaN}$ または $\text{GaN}$ 層がバッファ層のような作用をして、もう一方の単一層にクラックが入るのを防止することができるからである。これは、 $\text{InGaN}$ 層、 $\text{GaN}$ 層の結晶が $\text{AlGaIn}$ に比べて柔らかいことによるものである。これに対し、多層光反射膜を例えば互いにAl組成の異なる $\text{AlGaIn}$ 層により、例えば総膜厚 $0.5\mu\text{m}$ 以上となるように多層形成すると、多層膜中にクラックが入り、素子作製が困難となる。

【0075】各多層光反射膜を構成する2種類の窒化物半導体層の最良の組み合わせは、一方を前記のように $\text{In}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ または $\text{GaN}$ で形成し、もう一方をアルミニウムおよび／またはガリウムを含む窒化物半導体（例えば、 $\text{Al}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ （ここで、 $0 \leq c < 1$ ））で形成するものがある。 $\text{In}_q\text{Ga}_{1-q}\text{N}$ と $\text{Al}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ とは屈折率の差が大きいので、これらの材料で多層光反射膜を構成することにより、発光波長に応じて反射率の大きい多層光反射膜の設計が可能となる。また、 $\text{In}_q\text{Ga}_{1-q}\text{N}$ がバッファ層として作用し得るため、 $\text{Al}_c\text{Ga}_{1-c}\text{N}$ 層にクラックが入ることなく10層以上積層することができる。なお、 $\text{InN}$ 、 $\text{GaIn}$ 、および $\text{AlN}$ の屈折率は、それぞれ、2.9、2.5、および2.15である。これらの混晶の屈折率はベガードの法則に従うと仮定し、組成に比例するものとして求めることができる。

【0076】図9は、本発明の第4の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図であって、LD素子としての構造を示す。

【0077】図9に示す窒化物半導体発光素子90は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層94およびp型窒化物半導体層96からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0078】活性層95は、図1に示す半導体発光素子10における活性層15と同様、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造（単一量子井戸構造または多重量子井戸構造）のものであり、活性層15についての上記説明は、この活性層95にもそのまま適用される。

【0079】p型窒化物半導体層96は、活性層95の第2の主面に直接接して形成された第1のp型クラッド層96aおよびこの第1のp型クラッド層96a上に形成された第2のp型クラッド層96bを含む。

【0080】第1のp型クラッド層96aは、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成されている。第1のp型クラッド層96aをアルミニウムとガリウムを含む窒化物半導体で形成すると、量子井戸構造故に不十分であり得る活性層95中の光閉じ込めがより完全なものとなり、このように第1のp型クラッド層95は活性層95中に光を閉じ込めるための良好な光ガイド層として作用することが見いだされた。

【0081】第1のp型クラッド層96aは、p型 $\text{Al}_d\text{Ga}_{1-d}\text{N}$ （ここで、 $0 < d < 1$ ）で形成することが最も好ましい。 $\text{AlGaIn}$ は高キャリア濃度のp型のものが得られやすく、しかも $\text{InGaIn}$ を包含する活性層95に対し、バンドギャップ差および屈折率差を、他の窒化物半導体に比べて、大きくできるからである。その上、p型 $\text{AlGaIn}$ は、他の窒化物半導体に比べて、成長時に分解しにくいという性質を有しており、例えば有機金属気相エピタキシャル成長法（MOVPE法）によりこれを成長させる際、下側の活性層95の $\text{InGaIn}$ の分解を抑制し、その結果として結晶性に優れた活性層95を提供し、もって発光素子の出力を向上させることとなる。

【0082】第1のp型クラッド層96aは、10オングストローム以上、 $1.0\mu\text{m}$ 以下の厚さを有することが好ましい。その厚さが10オングストロームよりも薄いと、第1のp型クラッド層を設けた効果が得られず、他方その厚さが $1.0\mu\text{m}$ よりも厚いと、第1のp型クラッド層自体にクラックが入りやすくなるため、素子作成が難しくなる傾向にある。第1のp型クラッド層96aは、10オングストローム以上 $0.5\mu\text{m}$ 以下の厚さを有することがさらに好ましい。

【0083】第1のp型クラッド層96aは、LED素子の場合を含めて一般的には上記範囲内の厚さを有することが好ましいが、特にLD素子の場合には、100オングストローム以上（同様の理由から、 $1.0\mu\text{m}$ 以下）の厚さを有することがさらに好ましい。その厚さが100オングストロームより薄いと、第1のp型クラッド層が光ガイド層として作用しにくくなるのである。この場合において、第1のp型クラッド層96aは、100オングストローム以上 $0.5\mu\text{m}$ 以下の厚さを有することが最も好ましい。

【0084】第1のp型クラッド層96a上に設けられる第2のp型クラッド層96bは、第1のp型クラッド層96aよりもバンドギャップが大きく、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成される。このようなp型窒化物半導体により第2のp型クラッド層96bを形成することにより、当該第2のクラッド層が光閉じ込め層として効果的に作用し、有効なLD素子等を提供できることがわかった。

【0085】第2のp型クラッド層96bも、第1のp型クラッド層96aの場合と同様に、高キャリア濃度のp型のものが得られやすいことから、三元混晶のp型 $\text{Al}_e\text{Ga}_{1-e}\text{N}$ （ここで、 $0 < e < 1$ ）で形成することが最も好ましい。加えて、第2のp型クラッド層96bは、これをp型 $\text{AlGaIn}$ で形成すると、第1のp型クラッド層とのバンドギャップの差および屈折率の差を大きくできるので、光閉じ込め層としてより一層効果的に作用するようになる。なお、第2のp型クラッド層96bは、第1のp型クラッド層96aよりもバンドギャップが大きいので、例えば、前者を構成する $\text{Al}_e\text{Ga}_{1-e}\text{N}$ におけるfの値は、後者を構成する $\text{Al}_d\text{Ga}_{1-d}\text{N}$ におけるeの値よりも大きい値をとる。この場合でも、できれば、これら式におけるd値およびe値は、0を超え0.6までであることが望ましく、0を超え0.4までであることがさらに望ましい。

【0086】第2のp型クラッド層96bは、その厚さに特に制限はないが、500オングストロームないし $1\mu\text{m}$ 程度の厚さを有することが好ましい。第2のp型クラッド層をこのような厚さに形成することにより、それ自体におけるクラックの発生がより少なく、従って結晶性がより良好で、しかも高キャリア濃度のp型 $\text{AlGaIn}$ 層が得られるのである。

【0087】なお、第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bは、いずれも、 $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$  という高キャリア濃度を有するものとして提供することができる。

【0088】また、第1のp型クラッド層96aと第2のp型クラッド層96b層との間に、p型 $\text{InGaIn}$ またはp型 $\text{GaIn}$ よりなる層を10オングストロームから $1\mu\text{m}$ までの厚さに形成してもよい。この層は、光ガイド層およびバッファ層として作用する。

【0089】活性層95の第1の主面に接して設けられているn型クラッド層94は、いずれものn型窒化物半導体で形成することができる。しかしながら、n型クラッド層94は、結晶性がより一層優れた層として形成され得ることから、 $\text{GaIn}$ 、 $\text{AlGaIn}$ 、 $\text{InGaIn}$ 等の二元混晶、三元混晶の窒化物半導体で形成することが好ましい。特に $\text{InGaIn}$ または $\text{GaIn}$ によりn型クラッド層94を形成することにより、その上により一層良好な活性層95を設けることができ、発光素子の出力が格段に向上する。

【0090】n型クラッド層94は、LD素子の場合には、100オングストローム以上、 $1\mu\text{m}$ 以下の膜厚で形成することが望ましい。

【0091】基板91は、図1に示す発光素子10における基板11と同様のものであり、基板11についての上記説明がこの基板91についてもそのまま適用できる。

【0092】基板92上に形成されているバッファ層92も、図1に示す発光素子10におけるバッファ層12と同様のものであり、バッファ層12についての上記説明がこのバッファ層92についてもそのまま適用できる。特別の場合には、このバッファ層92を省略することも同様である。

【0093】バッファ層92上に設けられているn型コンタクト層93も、図1に示す発光素子10におけるn型コンタクト層13と同様のものであり、n型コンタクト層13についての上記説明がこのn型コンタクト層93についてもそのまま適用できる。

【0094】第2のp型クラッド層96b上に設けられているp型コンタクト層97も、図1に示す発光素子におけるp型コンタクト層17と同様のものであり、p型コンタクト層17についての上記説明がこのp型コンタクト層97についてもそのまま適用できる。

【0095】n型コンタクト層93の露出表面に形成されている負電極98も、図1に示す発光素子における負電極18と同様のものであり、負電極18についての上記説明がこの負電極98についてもそのまま適用できる。

【0096】p型コンタクト層97に接続して設けられている正電極99も、図1に示す発光素子における正電極19と同様のものであり、正電極19についての上記



説明がこの正電極99についてもそのまま適用できる。ただし、図9に示すLD構造において、p型コンタクト層97上には、透孔100aを有し、二酸化ケイ素等の絶縁材料で形成された電流狭窄層100が設けられており、正電極99は、この電流狭窄層100の透孔100aを通してp型コンタクト層97と接している。

【0097】さて、本発明の第4の側面について、図9に関し、主としてLD素子について説明したが、LED素子の場合には、電流狭窄層100を設ける必要はない。また、LED素子の場合には、第2のp型クラッド層96bを省略することもできる。さらに、LED素子の場合には、n型クラッド層94の好ましい厚さは1000Å以上、1.0μm以下、さらに好ましくは3000Åないし1.0μmとなり、あるいはこのn型クラッド層94自体を省略することもできる。n型クラッド層94を省略した場合、n型コンタクト層93がクラッド層として作用し得る。LED素子の場合、図9に示す構造において、n型クラッド層94を省略し、かつ第2のp型クラッド層96bを省略し、当然電流狭窄層100をも省略し、n型コンタクト層をn型GaNで形成し、p型コンタクト層97をp型GaNで形成した構造、すなわち、インジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層を有し、その第1の主面上にn型GaN層が形成され、活性層の第2の主面上にアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体層が形成され、このp型窒化物半導体上にp型GaN層が形成された構造を有するものが最も好ましいLED素子構造である。これは、本発明の第11の側面による窒化物半導体発光素子に相当する。

【0098】図10は、本発明の第5の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図であって、図9と同様、LD素子としての構造を示す。

【0099】図10に示す窒化物半導体発光素子200は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層294およびp型窒化物半導体層296からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0100】n型窒化物半導体層294は、活性層95の第1の主面に直接接して形成された第1のn型クラッド層294aおよびこの第1のn型クラッド層294a上に形成された第2のn型クラッド層96bを含む。

【0101】第1のn型クラッド層294aは、n型GaNまたはインジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体で形成されている。第1のn型クラッド層294aをGaNまたはインジウムとガリウムを含む窒化物半導体で形成すると、量子井戸構造故に不十分であり得る活性層95中の光閉じ込めがより完全なものとなり、このように第1のn型クラッド層294aは、活性層95中に光を閉じ込めるための良好な光ガイド層として作用する

(LD素子の場合)ばかりでなく、当該第1のn型クラッド層がいわばバッファ層として作用してその上に形成される活性層95にクラックの発生を少なくさせ、発光素子の発光出力を増大させることができることが見出された。

【0102】第1のn型クラッド層294bは、 $In_rGa_{1-r}N$  (ここで、 $0 < r < 1$ ) で形成することが最も好ましい。この場合において、 $r$ の値は、上記理由と同様の理由から、好ましくは0.5まで、より好ましくは0.3まで、さらに好ましくは0.2までの値をとる。また、そのキャリア濃度も、上記理由と同様の理由から、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$  であることが好ましい。

【0103】第1のn型クラッド層294aは、1000Å以上の厚さを有することが好ましい。第1のn型クラッド層294aは、1000Å以上の厚さに形成することにより、活性層95と以後述べる第2のn型クラッド層294bとの間のバッファ層としてより一層効果的に作用する。すなわち、第1のn型クラッド層294aを構成する $InGa$ NまたはGaNは、その結晶が比較的柔らかいので、第2のn型クラッド層294bと活性層23との間の格子定数不整合と熱膨張係数差によって生じる歪をより一層効果的に吸収することができ、バッファ層としてより一層有効に作用することとなる。その結果、活性層95が十分に薄いものであっても、この第1のn型クラッド層294aの存在により、活性層95、第2のn型クラッド層294b、ひいてはp型クラッド層296にクラックが入りにくくなり、それらの結晶性が良好なものとなるので、発光素子の発光出力をより一層増大させる。

【0104】第1のn型クラッド層294aは、LED素子の場合には、上記範囲内の厚さを有することが好ましいが、特にLD素子の場合には、1000Å以上厚さを有することが特に好ましい。その厚さが1000Å未満であると、光ガイド層として作用しにくくなるのである。

【0105】また、第1のn型クラッド層294aは、いずれの場合でも、1.0μm以下の厚さを有することが好ましい。その厚さが1.0μmよりも厚いと、その結晶の色が黒味を帯びるとともに、多数のピットが結晶中に生成する傾向にあり、そのため、高出力のLED、LD素子を得ることが困難となり得る。

【0106】第1のn型クラッド層294aに接して設けられている第2のn型クラッド層294bは、バンドギャップが第1のn型クラッド層294aよりも大きければいずれの窒化物半導体で形成してもよく、例えば、GaN、AlGaN等の二元混晶、三元混晶の窒化物半導体で形成することができる。このようなn型窒化物半導体により第2のn型クラッド層294bを形成することにより、当該第2のn型クラッド層294bが光閉じ



込め層として効果的に作用し、有効なLD素子等を提供できることがわかった。

【0107】第2のn型クラッド層294bは、n型 $\text{Al}_f\text{Ga}_{1-f}\text{N}$ （ここで、 $0 < f < 1$ ）で形成することが最も好ましい。n型 $\text{AlGaIn}$ は、 $\text{InGaIn}$ を包含する活性層95に対し、バンドギャップ差および屈折率差を、他の窒化物半導体に比べて、大きくできるからである。この場合において、 $f$ の値は、上記理由と同様の理由から、0.6までの値をとることが好ましく、0.4までの値をとることがさらに好ましい。そのキャリア濃度も、上記理由と同様の理由から、 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であることが好ましい。また第2のn型クラッド層294bとn型コンタクト層93との間に、n型 $\text{InGaIn}$ よりなる層を設けることにより、 $\text{AlGaIn}$ よりなる第2のn型クラッド層を良好な結晶性をもってクラックの発生を少なくして成長させることができる。

【0108】第2のn型クラッド層294bは、その厚さに特に制限はないが、500オングストローム以上、1.0 $\mu\text{m}$ 以下の厚さを有することが好ましい。第2のn型クラッド層294bをこの範囲内の厚さに形成することによって、クラックがない結晶性の優れた第2のn型クラッド層294bが得られるのである。

【0109】活性層95の第2の主面に接して設けられているp型半導体層（クラッド層）296は、いずれものp型窒化物半導体で形成することができる。しかしながら、p型クラッド層296は、結晶性がより一層優れた層として形成され得ることから、p型 $\text{AlGaIn}$ で形成することが好ましい。p型 $\text{AlGaIn}$ は、他の窒化物半導体に比べて、成長時に分解しにくいという性質を有しており、例えば有機金属気相エピタキシャル成長法（MOVPE法）によりこれを成長させる際、下側の活性層95の $\text{InGaIn}$ の分解を抑制し、その結果として結晶性に優れた活性層95を提供し、もって発光素子の出力を向上させることとなる。この場合において、アルミニウムの比率やキャリア濃度については、図9に示す発光素子90における第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bについて好ましいとした値をとることが同様に好ましい。

【0110】p型クラッド層296は、LD素子の場合には、100オングストローム以上、1 $\mu\text{m}$ 以下の膜厚で形成することが望ましい。

【0111】活性層95、基板91、基板91上に形成されているバッファ層92、バッファ層92上に設けられているn型コンタクト層93、さらにはp型コンタクト層97、負電極98、正電極99および電流狭窄層100は、図9に示す発光素子に関して説明した通りのものである。

【0112】さて、本発明の第5の側面について、図10に関し、主としてLD素子について説明したが、LE

D素子の場合には、電流狭窄層100を設ける必要はない。また、LED素子の場合には、第2のn型クラッド層294bを省略することもできる。その場合、n型コンタクト層93が第2のn型クラッド層として作用する。

【0113】図11は、本発明の第6の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図であって、図9および図10と同様、LD素子としての構造を示す。

【0114】図11に示す窒化物半導体発光素子300は、活性層95、並びに活性層95を両側で挟んでいるn型窒化物半導体層294およびp型窒化物半導体層96からなる半導体積層構造を有する。この半導体積層構造は、バッファ層92およびn型コンタクト層93を介して、基板91上に設けられている。

【0115】図11に示す発光素子300は、n型窒化物半導体層については図10に示す発光素子200におけるn型窒化物半導体層294（第1のn型クラッド層294aおよび第2のn型クラッド層294bからなる）を、p型窒化物半導体層については図9に示す発光素子90におけるp型窒化物半導体層96（第1のp型クラッド層96aおよび第2のp型クラッド層96bからなる）を適用したものであり、本発明の最も好ましい実施の形態の一つである。各半導体層その他の構成については、特にLED素子の場合に省略し得る窒化物半導体層および特にLED素子の場合の窒化物半導体層の厚さについての上記説明を含めて、図9および図10に関して説明したことがそのまま適用でき、他言を要しない。従って、図11に示す発光素子において、n型コンタクト層93をn型 $\text{GaIn}$ で、第2のn型クラッド層294bをn型 $\text{AlGaIn}$ で、第1のn型クラッド層294aをn型 $\text{InGaIn}$ またはn型 $\text{GaIn}$ で、第1のp型クラッド層96aをp型 $\text{AlGaIn}$ で、第2のp型クラッド層96bをp型 $\text{AlGaIn}$ で、p型コンタクト層97をp型 $\text{GaIn}$ でそれぞれ形成し、活性層95をノンドープとすることが最も好ましい。なお、図11に示すLD素子構造の場合には、いうまでもなく、第1のn型クラッド層294aが光ガイド層、第2のクラッド層294bが光閉じ込め層、第1のp型クラッド層96aが光ガイド層、第2のp型クラッド層96bが光閉じ込め層として作用することも明らかである。また第1のp型クラッド層96aと第2のp型クラッド層96bとの間に、p型 $\text{InGaIn}$ またはp型 $\text{GaIn}$ よりなる層をバッファ層として形成してもよいし、n型コンタクト層93と第2のn型クラッド層294bとの間に、n型 $\text{InGaIn}$ よりなる層をバッファ層として形成してもよい。

【0116】本発明の第7の側面によれば、n型窒化物半導体層とp型窒化物半導体層との間にインジウムとガリウムを含む窒化物半導体を包含する量子井戸構造の活性層を有し、p型窒化物半導体層は、活性層と接して

形成されかつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型クラッド層を含み、第1のp型クラッド層は、10オングストローム以上、 $1.0\mu\text{m}$ 以下の厚さを有することを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0117】この第7の側面による発光素子は、基本的には、図9に示す発光素子90の構造から第2のp型クラッド層96bを省略した特別の場合に該当する。この特別の場合には、さらに、図9に示す発光素子の構造からn型コンタクト層93およびn型クラッド層94のうちのいずれかを省略してもよく（n型クラッド層を94を省略した場合、n型コンタクト層93がn型クラッド層として作用する）、またp型コンタクト層97をも省略してもよい。

【0118】さらにまた、この特別の場合には、図9に示す発光素子90における第2のp型クラッド層96bに相当する第2のp型クラッド層をp型Ga<sub>1-y</sub>Nまたはインジウムとガリウムとを含むp型窒化物半導体（好ましくは、InGa<sub>1-y</sub>N）で形成することができ、これについては、図1に示す発光素子10におけるn型クラッド層14についての説明が適用できる。さらにまた、図9に示す発光素子90におけるn型クラッド層94に相当するn型クラッド層（第1のn型半導体層）に接して、すなわち第1のn型クラッド層94とn型コンタクト層93との間に、n型Ga<sub>1-y</sub>Nまたはアルミニウムとガリウムとを含む第2のn型窒化物半導体（好ましくは、AlGa<sub>1-y</sub>N）を設けることも好ましい。この場合については、n型Ga<sub>1-y</sub>N層を含めて、図2に示す発光素子20における第2のn型クラッド層21についての説明が適用できる。

【0119】図12は、本発明の第8の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図であって、LD素子として特に好ましい構造の一つを示している。図12の窒化物半導体発光素子は、以下述べる第1のp型クラッド層を除くと、図6に関して説明した第3の側面の好ましい形態にほぼ相当するといえることができる。

【0120】図12に示す窒化物半導体発光素子400は、活性層405を備え、その第1の主面上には、第1のn型クラッド層414、第2のn型クラッド層424およびn型コンタクト層403を含むn型半導体層が設けられている。加えて、活性層405の第2の主面には、第1のp型クラッド層416、第2のp型クラッド層426、第3のp型クラッド層436、および最外層としてのp型コンタクト層407を含むp型窒化物半導体層を有する。このような積層構造は、図12に示す構造では、バッファ層402を介して、基板401上に設けられている。

【0121】活性層405は、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含するものであり、当該インジ

ウムとガリウムとを含む窒化物半導体の量子準位間発光を生じさせる構造、言い換えると量子井戸構造を構成する。このような構造については、図1に示す発光素子10の活性層15に関して説明したことがすべてそのまま適用される。LD素子の場合、活性層405は多重量子井戸構造をとることが最も好ましい。

【0122】活性層405の第1の主面に接して設けられている第1のn型クラッド層414は光ガイド層として作用するものであり、インジウムとガリウムを含むn型窒化物半導体またはn型Ga<sub>1-y</sub>Nで形成されている。より具体的には、この第1のn型クラッド層54は、n型In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N（ここで、 $0 \leq y < 1$ ）で形成される。すなわち、この第1のn型クラッド層414は、図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明したn型InGa<sub>1-y</sub>Nで形成することもできるし、n型Ga<sub>1-y</sub>Nで形成することもできる。図1に示す発光素子10における第1のn型クラッド層14に関して説明した理由と同様の理由から、yの値は、 $0 \leq y \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは $0 < y \leq 0.3$ 、最も好ましくは $0 < y \leq 0.2$ の範囲内にある。第1のn型クラッド層414のキャリア濃度も、同様の理由から、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。第1のn型クラッド層414も、その厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層15と第1のn型クラッド層414とは、合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、 $1\mu\text{m}$ 以下の厚さを有し得る。

【0123】第1のn型クラッド層上に設けられている第2のn型クラッド層424は、光閉じ込め層として作用するものであり、第1のn型クラッド層414よりもバンドギャップが大きく、かつアルミニウムとガリウムとを含むn型窒化物半導体またはn型Ga<sub>1-y</sub>Nで形成されている。このような第2のn型クラッド層424を設けることによって、第1のn型クラッド層414との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0124】この第2のn型クラッド層424は、n型Al<sub>g</sub>Ga<sub>1-g</sub>N（ここで、 $0 < g < 1$ ）で形成する場合には、gの値は、 $0 < g \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。AlGa<sub>1-g</sub>Nはその結晶が比較的硬く、0.6より大きいと、第1のn型クラッド層414の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。g値は、 $0 < g \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。

【0125】また、第2のn型クラッド層424のキャリア濃度は、 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ よりも低いと、特にAlGa<sub>1-g</sub>Nの抵抗

率が高くなるので、発光素子のVfが高くなり、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いと特にAlGaInの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。

【0126】第2のn型クラッド層424は、通常、50オングストローム～0.5μmの厚さをもって形成することができる。

【0127】n型半導体層の最外層（活性層から最も離れて位置する層）として形成されている（図12では、第2のn型クラッド層424に接して形成されている）n型コンタクト層403は、n型GaInで形成されている。図1の発光素子10におけるn型コンタクト層13をn型GaInで形成することが好ましいとした理由と同様の理由から、n型コンタクト層403は、n型GaInで形成される。その他の例えばキャリア濃度は、図1に示す発光素子10におけるn型コンタクト層13の場合に好ましいとして記載した濃度であることが同様に好ましい。

【0128】活性層405の第2の主面に接して設けられている第1のp型クラッド層416は、キャップ層として作用するものであり、これまで説明してきた他の形態における第1のp型クラッド層と同様に活性層の分解を防止して発光素子の発光出力を向上させるものである。この第1のp型クラッド層416は、アルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体で形成されている。このような第1のp型クラッド層416を設けることによって、より一層優れたLD素子を提供できることがわかった。

【0129】この第1のp型クラッド層416は、好ましくは、p型 $\text{Al}_h\text{Ga}_{1-h}\text{N}$ （ここで、 $0 < h < 1$ ）で形成される。この場合において、hの値は、 $0 < h \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。AlGaInはその結晶が比較的硬く、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。h値は、 $0 < h \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。

【0130】また、第1のp型クラッド層416のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、活性層405への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAlGaInの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。

【0131】第1のp型クラッド層416は、通常、50オングストローム～0.5μmの厚さをもって形成することができる。

【0132】第1のp型クラッド層416上に設けられている第2のp型クラッド層426は、光ガイド層として作用し、インジウムとガリウムとを含むp型窒化物半

導体またはp型GaInで形成されている。より具体的には、第1のp型クラッド層416は、p型 $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ （ここで、 $0 \leq z < 1$ ）で形成することが望ましい。図3の発光素子30における第1のp型クラッド層36に関して説明した理由と同様の理由から、z値は、 $0 \leq z \leq 0.5$ の範囲内にあることが好ましく、さらに好ましくは $0 \leq z \leq 0.3$ の範囲内、最も好ましくは $0 \leq z \leq 0.2$ の範囲内にある。この第1のp型クラッド層416も同様にGaInにより形成してもいわばバッファ層として同様に作用する。また、この第1のp型クラッド層416のキャリア濃度も、同様の理由から、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。さらに、第1のクラッド層416の厚さに特に制限はないが、同様の理由から、活性層405との合計で、300オングストローム以上の厚さを有することが望ましく、1μm以下の厚さを有し得る。

【0133】第2のp型クラッド層426上に設けられている第3のp型クラッド層436は、光閉じ込め層として作用し、第2のp型クラッド層426よりもバンドギャップが大きく、かつアルミニウムとガリウムを含むp型の窒化物半導体で形成されている。このような第3のp型クラッド層436を設けることによって、第2のp型クラッド層426との間のバンドギャップ差を大きくすることができ、発光素子の発光効率を向上させることができる。

【0134】この第3のp型クラッド層436は、好ましくは、p型 $\text{Al}_i\text{Ga}_{1-i}\text{N}$ （ここで、 $0 < i < 1$ ）で形成される。この場合において、iの値は、 $0 < i \leq 0.6$ の範囲内にあることが好ましい。AlGaInはその結晶が比較的硬く、0.6より大きいと、第2のp型クラッド層426の存在にもかかわらず、その層にクラックが比較的発生しやすくなり、発光出力を低下させる傾向にあるからである。b値は、 $0 < b \leq 0.4$ の範囲内にあることが最も好ましい。

【0135】また、第3のp型クラッド層436のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ の範囲内にあることが望ましい。そのキャリア濃度が $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと、活性層405への正孔の注入効率が低下し、発光効率が低下する傾向にあり、一方、そのキャリア濃度が $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ よりも高いとAlGaInの結晶性が悪くなり発光効率が低下するからである。第3のp型クラッド層436は、通常、50オングストローム～0.5μmの厚さをもって形成することができる。

【0136】p型半導体層の最外層（活性層405から最も離れて位置する層）として形成されている（図12では、第3のp型クラッド層436に接して設けられている）p型コンタクト層407は、p型GaInで形成されている。図1の発光素子10におけるp型コンタクト層17をp型GaInで形成することが好ましいとした理

由と同様の理由から、p型コンタクト層407は、p型GaNで形成される。その他の例えばキャリア濃度は、図1に示す発光素子10におけるp型コンタクト層17の場合に好ましいとして記載した濃度であることが同様に好ましい。

【0137】基板401、バッファ層402、負電極408および正電極409は、それぞれ、図1に示す発光素子10における基板11、バッファ層12、負電極18および正電極19について説明した通りのものである。また、透孔440aを有する電流狭窄層440についても、図9に示す発光素子90における電流狭窄層100について説明した通りのものである。

【0138】本発明の第9の側面によれば、第1および第2の主面を有し、インジウムとガリウムとを含む窒化物半導体よりなる量子井戸構造の活性層、該活性層の第1の主面上に設けられたn型窒化物半導体層、および該活性層の第2の主面上に設けられたp型窒化物半導体層を有する半導体積層構造を備え、該p型窒化物半導体層は、該活性層の第2の主面に接して形成され、かつアルミニウムとガリウムを含むp型窒化物半導体よりなる第1のp型層、および該第1のp型層に接して設けられたp型GaNよりなる第2のp型層を含むことを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。この第9の側面による発光素子は、図9に示す発光素子90の構造から第2のp型クラッド層96bとn型クラッド層94を省略し、かつp型コンタクト層97をp型GaNで形成した特別の場合に該当する。この場合、n型コンタクト層93を最も好ましくはn型GaNで形成することができる。

【0139】図13は、量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを変えて本発明の種々の窒化物半導体発光素子を作製し、その発光出力（相対値）と井戸層の厚さとの関係を調べた結果をグラフで示したものである。図13からわかるように、本発明の窒化物半導体発光素子における量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを70オングストローム以下にすると、発光素子の発光出力が顕著に向上することがわかる。井戸層の厚さが50オングストローム以下となると、発光素子の発光出力は、さらに向上することもわかる。このような傾向は、本発明のすべての窒化物半導体発光素子について、単一量子井戸構造の活性層においても、多重量子井戸構造の活性層においても、確認されたばかりでなく、広く、活性層を挟持する2つのクラッド層の一方がp型窒化物半導体で形成され、他方がn型窒化物半導体で形成された場合にも確認された。

【0140】そこで、本発明の第10の側面によれば、n型窒化物半導体層とp型窒化物半導体層との間にインジウムとガリウムとを含む窒化物半導体を包含する少なくとも1層の井戸層を有する量子井戸構造の活性層を備え、井戸層は、70オングストローム以下の厚さを有す

ることを特徴とする窒化物半導体発光素子が提供される。

【0141】図14は、多重量子井戸構造の活性層の井戸層の厚さを一定にし、障壁層の厚さを変えて本発明の種々の窒化物半導体発光素子を作製し、その発光出力（相対値）と障壁層の厚さとの関係を調べた結果をグラフとして示したものである。図14からわかるように、本発明の窒化物半導体発光素子における量子井戸構造の活性層の障壁層の厚さを150オングストローム以下にすると、発光素子の発光出力が顕著に向上することがわかる。障壁層の厚さが100オングストローム以下となると、発光素子の発光出力は、さらに向上することもわかる。このような傾向は、本発明のすべての窒化物半導体発光素子について確認されたばかりでなく、広く、活性層を挟持する2つのクラッド層の一方がp型窒化物半導体で形成され、他方がn型窒化物半導体で形成された場合にも確認された。

【0142】図15は、図9に示す構造に類似する構造の発光素子について、第1のp型クラッド層96aの厚さを変えた場合におけるその厚さと発光出力（相対値）との関係を示すグラフである。図15は、より具体的には、図9に示す構造において、サファイア基板91上にGaNバッファ層92を介してn型GaNコンタクト層93を4 $\mu$ mの厚さに、n型InGaNクラッド層94を500オングストロームの厚さに、単一量子井戸構造のInGaN活性層95を20オングストロームの厚さに形成し、その上に第1のp型AlGaNクラッド層96aを厚さを変えて形成し、さらにその上に第2のp型AlGaNクラッド層96bを0.1 $\mu$ mの厚さに形成し、p型GaNコンタクト層97を1 $\mu$ mの厚さに形成し、負電極98を形成し、電流狭窄層100を設けることなく正電極99を形成したLED素子についてのものである。

【0143】図15に示すように、第1のp型クラッド層96aの厚さが1 $\mu$ mよりも厚くなると発光出力は急激に低下する傾向にある。そのような厚さになると、第1のp型クラッド層96aにクラックが入り、素子の結晶性が悪くなることによるものである。図15から、LED素子の場合には、第1のp型クラッド層96aの膜さは10オングストローム（0.001 $\mu$ m）以上、1 $\mu$ m以下の厚さが好ましいことがわかる。このような傾向は、第1のp型クラッド層をAlGaNで形成する本発明の他の形態の窒化物半導体発光素子のすべてについて確認された。なお、LD素子の場合に第1のp型クラッド層の好ましい厚さが100オングストローム以上であるのは、上記の通り、別の理由による。

【0144】図16は、図10に示す構造に類似する構造の発光素子について、第1のn型クラッド層294aの厚さを変えた場合におけるその厚さと発光出力（相対値）との関係を示すグラフである。図16は、より具体

的には、図10に示す構造において、サファイア基板91上にGa<sub>0.99</sub>Nバッファ層92を介してn型Ga<sub>0.99</sub>Nコンタクト層93を4 $\mu$ mの厚さに、第2のn型Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nクラッド層294bを0.1 $\mu$ mの厚さに形成し、第1のn型InGa<sub>0.99</sub>Nクラッド層294aを厚さを変えて形成し、さらにその上に、単一量子井戸構造のInGa<sub>0.99</sub>N活性層95を20 $\mu$ mの厚さに、p型Al<sub>0.3</sub>GaNクラッド層296を0.1 $\mu$ mの厚さに形成し、負電極98を形成し、電流狭窄層100を設けることなく正電極99を形成したLED素子についてのものである。

【0145】図16からわかるように、第1のn型クラッド層294aの厚さが1 $\mu$ mよりも厚くなると発光出力は急激に低下する傾向にある。これは第1のn型クラッド層294a自体の結晶性が悪くなり、例えば結晶が黒くなったり、ヒットが発生するためである。また第1のn型クラッド層294aの厚さが30 $\mu$ mよりも薄くなっても、発光出力が低下する傾向にある。これはInGa<sub>0.99</sub>Nよりなる第1のn型クラッド層294aがバッファ層として効果的に作用する好ましい膜厚が30 $\mu$ m以上であることを示している。このような傾向は、第1のn型クラッド層をInGa<sub>0.99</sub>NまたはGa<sub>0.99</sub>Nで形成する本発明の他の形態の窒化物半導体発光素子のすべてについて確認された。なお、既に説明したように、第1のn型クラッド層294aが10 $\mu$ mよりも薄くなると、バッファ層として作用せず、その上に形成される活性層95およびクラッド層294b、296に多数のクラックが発生するため、素子作製も難しくなり、発光出力は大幅に低下する。

【0146】さて、本発明において、窒化物半導体は、いずれも、ドナー不純物をドーピングしないで成長させてもn型を示すが、最も好ましくは窒化物半導体の結晶成長中にSi、Ge、Te、S等のドナー不純物をドーピングする。ドナー不純物濃度を調整することにより、n型窒化物半導体層のキャリア濃度を調整できる。

【0147】また、本発明において、p型窒化物半導体層は、いずれも、窒化物半導体の結晶成長中にMg、Zn、Cd、Ca、Be、C等のアクセプター不純物を窒化物半導体の結晶成長中にドーピングすることによって得られる。このようにアクセプター不純物をドーピングして成長させた窒化物半導体層を400℃以上の温度でアニーリングを行うことによりより一層好ましいp型窒化物半導体層が得られる。アクセプター不純物の濃度を調整することにより、p型窒化物半導体層のキャリア濃度を調整することができる。

【0148】本発明の窒化物半導体発光素子は、例えばMOVPE（有機金属気相成長法）、MBE（分子線気相成長法）、HDVPE（ハイドライド気相成長法）等の気相成長法を用いて、基板上に各窒化物半導体層を形

成することによって好ましく製造することができる。例えば、有機インジウム化合物、有機ガリウム化合物、有機アルミニウム化合物、アンモニア等の窒化物半導体源を用い、必要に応じて不純物源をも用いて有機MOVPE法により基板上に各窒化物半導体層を形成し、正電極および負電極を形成して本発明の窒化物半導体発光素子を製造することができる。

【0149】以上、図面を参照して本発明の実施の形態を説明したが、本発明は、これらに限定されるものではない。例えば図9における電流狭窄層100は、LED素子とした場合における第1～第3の側面による本発明の半導体発光素子にも適用できる。また、1つのn型もしくはp型InGa<sub>0.99</sub>N層についてのインジウムの比率およびキャリア濃度に関する説明は、他のn型もしくはp型InGa<sub>0.99</sub>N層についても同様にあてはまり、1つのn型もしくはp型Al<sub>0.3</sub>GaN層についてのアルミニウムの比率およびキャリア濃度に関する説明は、他のn型もしくはp型Al<sub>0.3</sub>GaN層についても同様にあてはまることが明らかであろう。なお、以上の説明からも明らかなように、主面とは、窒化物半導体層（具体的には、活性層）において他の層が形成される面を意味する。

#### 【0150】

【実施例】以下本発明を実施例に基づいて説明する。以下の実施例では、全ての窒化物半導体層をMOVPE法により成長させている。

#### 【0151】実施例1

まず、原料ガスとしてTMG（トリメチルガリウム）とNH<sub>3</sub>を用い、反応容器にセットしたサファイア基板のC面に500℃でGa<sub>0.99</sub>Nよりなるバッファ層を500 $\mu$ mの厚さに成長させた。

【0152】次に温度を1050℃まで上げ、TMGとNH<sub>3</sub>からなる上記原料ガスにシランガスを加え、Siドーピングn型Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nよりなる第2のn型クラッド層を0.1 $\mu$ mの厚さに成長させた。このn型コンタクト層の電子キャリア濃度は、 $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であった。

【0153】続いて、上記原料ガスにさらにTMA（トリメチルアルミニウム）を加え、同じく1050℃でSiドーピングn型Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Nよりなる第2のn型クラッド層を0.1 $\mu$ mの厚さに成長させた。この第2のn型クラッド層の電子キャリア濃度は $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ であった。

【0154】次に、温度を800℃に下げ、原料ガスとしてTMG、TMI（トリメチルインジウム）、NH<sub>3</sub>およびシランガスをを用い、Siドーピングn型In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>Nよりなる第1のn型クラッド層を500 $\mu$ mの厚さに成長させた。この第1のn型クラッド層の電子キャリア濃度は、 $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ であった。

【0155】続いて、原料ガスとしてTMG、TMIおよびNH<sub>3</sub>を用い、800℃でノンドープIn<sub>0.05</sub>Ga

$0.95\text{N}$ を30オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0156】次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 $\text{NH}_3$  および $\text{Cp}_2\text{Mg}$ （シクロペンタジエニルマグネシウム）を用い、Mgドープp型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のp型クラッド層を0.1 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させた。この第2のp型クラッド層のホールキャリア濃度は $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ であった。

【0157】続いて、原料ガスとしてTMG、 $\text{NH}_3$  および $\text{Cp}_2\text{Mg}$ を用い、1050℃でMgドープp型Ga $\text{N}$ よりなるp型コンタクト層を0.5 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させた。このp型コンタクト層のホールキャリア濃度は $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0158】しかる後、温度を室温まで下げ、ウエーハを反応容器から取り出し、700℃でウエーハのアニリングを行って各p型層をさらに低抵抗化させた。次に、最上層のp型コンタクト層の表面に所定の形状のマスクを形成し、n型コンタクト層の表面が露出するまでエッチングした。n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成し、p型コンタクト層の表面にNiとAuよりなる正電極を形成した。

【0159】電極形成後、ウエーハを350 $\mu\text{m}$ 角のチップに分離した後、常法に従い半値角15度の指向特性を持つLED素子とした。このLED素子はIf（順方向電流）20mAにおいて、Vf（順方向電圧）3.5V、発光ピーク波長415nmの青色発光を示し、発光出力は6mWであった。また、その発光スペクトルの半値幅は20nmであり、非常に色純度の良い発光を示した。

#### 【0160】実施例2

実施例1と同様にしてサファイア基板の上にSiドープn型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 層よりなる第2のn型クラッド層まで成長させた後、第2のクラッド層の上に実施例1と同様の条件で、ノンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ を40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0161】次に、活性層の上に、原料ガスとしてTMG、TMI、 $\text{NH}_3$  および $\text{Cp}_2\text{Mg}$ を用い、800℃で、Mgドープp型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ よりなる第1のp型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のp型層のアニリング後のホールキャリア濃度は $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ であった。

【0162】これ以降の第2のp型クラッド層、p型コンタクト層の成長、その他は実施例1と同様にして所望のLED素子を得た。このLED素子は、If 20mAにおいて、Vf 3.5V、発光ピーク波長410nm、発光スペクトルの半値幅20nmであり、発光出力は5mWであった。

#### 【0163】実施例3

実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、Siドープn型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ よりなる第1のn型クラッド層まで成長させた後、その第1のn型クラッド層の上に、ノンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ を40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0164】続いて、原料ガスとしてTMG、TMI、 $\text{NH}_3$  および $\text{Cp}_2\text{Mg}$ を用い、800℃で、Mgドープp型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ よりなる第1のp型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のp型クラッド層のアニリング後のホールキャリア濃度は、 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ であった。

【0165】次に、実施例1と同様にして、第1のp型クラッド層上にMgドープp型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のp型クラッド層を成長させ、そしてその上にMgドープp型Ga $\text{N}$ よりなるp型コンタクト層を成長させた。その後、実施例1と同様にして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、If 20mAでVf 3.5V、発光ピーク波長410nm、発光スペクトルの半値幅20nmであり、発光出力は6mWであった。

#### 【0166】実施例4

実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、Siドープn型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 層よりなる第2のn型クラッド層まで成長させた後、その第2のn型クラッド層の上に、Siドープn型Ga $\text{N}$ よりなる第1のn型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。この第1のn型クラッド層の電子キャリア濃度は $2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ であった。

【0167】次に、実施例3と同様に第1のn型クラッド層55の上に、ノンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ を40オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0168】次に、活性層の上に、実施例1と同様にして、Mgドープp型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のp型クラッド層とMgドープp型Ga $\text{N}$ よりなるp型コンタクト層を順次成長させた。これ以降は実施例1と同様にしてLED素子を得た。このLED素子は、If 20mAでVf 3.5V、発光ピーク波長415nm、発光スペクトルの半値幅20nmであり、発光出力は5mWであった。

#### 【0169】実施例5

活性層を $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ で形成した以外は実施例1と同様にしてLED素子を作製した。このLED素子は、If 20mAにおいて、Vf 3.5V、発光ピーク波長455nm、半値幅20nmの青色発光を示し、発光出力は5mWであった。

#### 【0170】実施例6

本実施例は、活性層の形成以外は実施例1と同様に行った。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、原料ガスとしてTMG、TMIおよび $\text{NH}_3$ を用

い、800℃で、ノンドープ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 薄膜（井戸層）を20オングストロームの厚さに成長させた。続いて、 $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 薄膜（障壁層）を20オングストローム厚さに成長させた。この操作を交互にそれぞれ3回ずつ繰り返し、最後に $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 薄膜（障壁層）を20オングストロームの厚さに成長させ、総膜厚140オングストロームの多重量子井戸構造の活性層を形成した。こうして得られたLED素子は、 $\text{If}$  20mAにおいて、 $\text{Vf}$  3.5V、発光ピーク波長420nmの青色発光を示し、発光出力は7mWであった。

#### 実施例7

アクセプター不純物源としてDEZ（ジエチルジンク）、ドナー不純物としてシランガスを用い、活性層としてSiとZnをドーパした単一量子井戸構造の $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層を50オングストロームの厚さに形成した以外は実施例1と同様にしてLED素子を作製した。このLED素子は $\text{If}$  20mAにおいて、 $\text{Vf}$  3.5V、発光ピーク波長450nm、半値幅70nmの青色発光を示し、発光出力3mWであった。

#### 【0171】実施例8

実施例1の手法に従い、n型コンタクト層の上にSiドーパn型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ よりなる第1のn型クラッド層、ノンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる活性層、Mgドーパp型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のp型クラッド層、およびMgドーパp型Ga $\text{N}$ よりなるp型コンタクト層を成長させた。すなわち、第2のn型クラッド層を形成しなかった以外は実施例1と同様にしてLED素子を得た。このLED素子は、 $\text{If}$  20mAにおいて、 $\text{Vf}$  3.5V、発光ピーク波長410nm、発光出力は5mWであった。

#### 【0172】実施例9

実施例1と同様にして、サファイア基板の上に、n型コンタクト層までの各半導体層を成長させた後、温度を800℃に下げ、原料ガスとしてTMG、TMI、 $\text{NH}_3$ およびシランガスを用い、Siドーパn型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ よりなる薄膜を380オングストロームの厚さに成長させた。次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 $\text{NH}_3$ およびシランガスを用い、Siドーパn型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなる薄膜を390オングストロームの厚さに成長させた。これらの操作を20回繰り返し、Siドーパn型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 層とSiドーパ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 層を交互に10層ずつ積層したn型多層膜（第1の多層反射膜）を形成した。

【0173】次に、n型多層膜上に、実施例3と同様にして、第2のn型クラッド層、第1のn型クラッド層、活性層、第1のp型クラッド層、および第2のp型クラッド層を順次成長させた。

【0174】次に、温度を800℃に設定して、原料ガ

スとしてTMG、TMI、 $\text{NH}_3$ および $\text{Cp}_2\text{Mg}$ を用い、第2のp型クラッド層上にMgドーパp型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 層を380オングストロームの厚さに成長させた後、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 $\text{NH}_3$ および $\text{Cp}_2\text{Mg}$ ガスを用い、Mgドーパp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 層を390オングストロームの厚さに成長させた。これらの操作を繰り返し、Mgドーパp型 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 層とMgドーパp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 層とを交互に10層ずつ積層したp型多層膜（第2の多層反射膜）を形成した。

【0175】ついで、p型多層膜上に、実施例1と同様にして、p型コンタクト層を成長させた。

【0176】こうして得られたウエーハについて、実施例1と同様にして窒化物半導体層をエッチングした後、最上層であるp型コンタクト層の表面に所定の形状のマスクを形成し、n型コンタクト層上に50 $\mu\text{m}$ の幅で負電極を、p型コンタクト層上に10 $\mu\text{m}$ の幅で正電極をそれぞれ形成した。このようにn型コンタクト層上にn型多層膜を形成すると、負電極を形成する水平面がn型多層膜よりも下、すなわち基板側となる。

【0177】次に、窒化物半導体層を形成していない方のサファイア基板面を研磨して基板の厚さを90 $\mu\text{m}$ にし、サファイア基板表面のM面（六方晶系において六角柱の側面に相当する面）をスクライプした。スクライプ後、ウエーハを700 $\mu\text{m}$ 角のチップに分割し、ストライプ型のLD素子を作製した。このLD素子は、ストライプ状の正電極と直交する窒化物半導体層面を光共振面としている。また、このLD素子の表面は、各電極表面を除き表面を $\text{SiO}_2$ よりなる絶縁膜（図示せず）で被覆されている。次に、このチップをヒートシンクに設置し、各電極をワイヤーボンドした後、常温でレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度1.5kA/cm<sup>2</sup>で発振波長390nmのレーザ発振が確認された。

#### 【0178】実施例10

まず、原料ガスとしてTMGと $\text{NH}_3$ とを用い、反応容器にセットしたサファイア基板のC面に、500℃で、Ga $\text{N}$ よりなるバッファ層を200オングストロームの厚さに成長させた。

【0179】次に、温度を1050℃まで上げ、TMGと $\text{NH}_3$ との原料ガスにシランガスを加え、Siドーパn型Ga $\text{N}$ よりなるn型コンタクト層を4 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させた。

【0180】ついで、温度を800℃に下げ、上記原料ガスにさらにTMIを加え、Siドーパn型 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 層よりなる第1のn型クラッド層を500オングストロームの厚さに成長させた。

【0181】続いて、800℃で、第1のn型クラッド層上にノンドープ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ を20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。



【0182】次に、温度を1050℃に上げ、原料ガスとしてTMG、TMA、 $\text{NH}_3$  および $\text{Cp}_2\text{Mg}$ を用い、Mgドープp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第1のp型クラッド層を0.1 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させた。

【0183】続いて、1050℃で、Mgドープp型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のp型クラッド層を0.5 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させた。

【0184】引き続き、1050℃でMgドープGaNよりなるp型コンタクト層を1.0 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させた。

【0185】反応終了後、温度を室温まで下げ、ウェーハを反応容器から取り出し、700℃でウェーハのアニーリングを行い、p型層をさらに低抵抗化させた。次に、最上層のp型コンタクト層からn型コンタクト層の表面が露出するまでエッチングした。エッチング後、p型コンタクト層の表面に $\text{SiO}_2$ の層を被着し、これに透孔を設けて電流狭窄層とし、さらにその電流狭窄層上に、p型コンタクト層と透孔を介して接続するNiとAuよりなる正電極を形成した。また、n型コンタクト層の上記露出表面に、TiとAlよりなる負電極を形成した。

【0186】次に、窒化物半導体層を形成していない方のサファイア基板面を研磨して基板の厚さを90 $\mu\text{m}$ とし、サファイア基板のM面をスクライブして強制的に劈開し、レーザチップを得た。その劈開面に誘電体多層膜を設けた後、チップをヒートシンクに設置し、常温でレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度2.0 $\text{kA}/\text{cm}^2$ で発振波長450nmのレーザ発振が確認された。

#### 【0187】実施例11

実施例10と同様にして、サファイア基板上にGa<sub>0.9</sub>Nバッファ層を200オングストロームの厚さに、n型Ga<sub>0.9</sub>Nよりなるn型コンタクト層を4 $\mu\text{m}$ の厚さに順次形成した。

【0188】次に、Siドープn型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のn型クラッド層を0.5 $\mu\text{m}$ の厚さに形成した後、Siドープn型 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第1のn型クラッド層71を500オングストロームの厚さに形成した。

【0189】次にノンドープ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ を20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成し、その上にMgドープp型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のp型クラッド層を0.5 $\mu\text{m}$ の厚さに、ついでMgドープp型Ga<sub>0.9</sub>Nよりなるp型コンタクト層を1 $\mu\text{m}$ の厚さに形成した。

【0190】これ以降は実施例10と同様にして、得られたLD素子のレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度2.0 $\text{kA}/\text{cm}^2$ で発振波長450nmのレーザ発振が確認された。

#### 【0191】実施例12

実施例10と同様にして、サファイア基板上にGa<sub>0.9</sub>Nバッファ層を200オングストロームの厚さに、n型Ga<sub>0.9</sub>Nよりなるn型コンタクト層を4 $\mu\text{m}$ の厚さに順次形成した。

【0192】次に、Siドープn型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のn型クラッド層を0.5 $\mu\text{m}$ の厚さに形成した後、Siドープn型 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第1のn型クラッド層を0.1 $\mu\text{m}$ の厚さに形成した。

【0193】ついで、ノンドープ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ を20オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成し、その上にMgドープp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第1のp型クラッド層を0.1 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させ、さらにMgドープp型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる第2のp型クラッド層を0.5 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させ、最後にMgドープp型Ga<sub>0.9</sub>Nよりなるp型コンタクト層を0.5 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させた。

【0194】これ以降は実施例10と同様にして、得られたLD素子のレーザ発振を試みたところ、実施例10および11のLD素子のしきい値電流密度よりも低いしきい値電流密度1.0 $\text{kA}/\text{cm}^2$ で発振波長450nmのレーザ発振が確認された。

#### 【0195】実施例13

この実施例は、第1のn型クラッド層および活性層の形成を除き、実施例12と同様に行った。すなわち、第1のn型クラッド層として、Siドープn型 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ の代わりに、Siドープn型Ga<sub>0.9</sub>N層を0.1 $\mu\text{m}$ の厚さに成長させた。また、活性層を形成するために、ノンドープ $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 井戸層を30オングストロームの厚さに成長させ、その上にノンドープ $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ 障壁層を50オングストロームの厚さに成長させるという操作を繰り返し、井戸層/障壁層/井戸層/障壁層/井戸層という5層構成で総膜厚190オングストロームの多重量子井戸構造の活性層を成長させた。

【0196】得られたLD素子について、実施例10と同様にしてレーザ発振を試みたところ、しきい値電流密度0.9 $\text{kA}/\text{cm}^2$ で500nmのレーザ発振を示した。

#### 実施例14

第1のp型クラッド層を形成した後、第2のp型クラッド層を形成することなくp型コンタクト層を形成した以外は実施例10と同様にして、サファイア基板上にp型コンタクト層までの各半導体層を成長させた。得られたウェーハについて、実施例10と同様に、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上に、電流狭窄層を形成することなく、NiとAuよりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このL



ED素子は、 $I_f$  20mAにおいて、 $V_f$  3.5V、発光波長450nmの青色発光を示し、発光出力は6mWであった。また、発光スペクトルの半値幅は20nmとシャープなバンド間発光を示した。

#### 【0197】実施例15

実施例10と同様にして、サファイア基板上にp型コンタクト層までの各半導体層を成長させた。得られたウエーハについて、実施例10と同様に、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上に、電流狭窄層を形成することなく、NiとAuよりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、 $I_f$  20mAにおいて、 $V_f$  3.5V、発光波長450nmの青色発光を示し、発光出力は6mWと高出力であった。発光スペクトルの半値幅は20nmとシャープなバンド間発光を示した。

#### 【0198】実施例16

実施例10と同様にして、サファイア基板上に、Ga<sub>0.8</sub>Nバッファ層を200オングストロームの厚さに、n型Ga<sub>0.8</sub>Nよりなるn型コンタクト層を4μmの厚さに順次形成した。このn型コンタクト層は、本実施例のLED素子において第1のn型クラッド層としても作用する。

【0199】次に、n型コンタクト層の上に、ノンドープIn<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Nを30オングストロームの厚さに成長させて単一量子井戸構造の活性層を形成した。

【0200】ついで、Mgドープp型Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>Nよりなる第1のp型クラッド層を0.05μmの厚さに成長させ、その上にMgドープp型Ga<sub>0.8</sub>Nよりなるp型コンタクト層を0.5μmの厚さに直接成長させた。

【0201】しかる後、実施例14と同様にして、アニーリングによるp型窒化物半導体層の低抵抗化、およびp型コンタクト層からn型コンタクト層までのエッチングを行った後、p型コンタクト層上にNiとAuよりなる正電極を直接形成し、n型コンタクト層の露出表面にTiとAlよりなる負電極を形成した。こうして、所望のLED素子を得た。このLED素子は、 $I_f$  20mAにおいて、 $V_f$  3.5V、発光波長450nmの青色発光を示し、発光出力も7mWと高出力であった。発光スペクトルの半値幅は、20nmとシャープなバンド間発光を示した。

#### 【0202】実施例17

活性層としてIn<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>Nを50オングストロームの厚さに成長させた以外は実施例16と同様の操作によりLED素子を得た。このLED素子は、このLED素子は、 $I_f$  20mAにおいて、 $V_f$  3.5V、発光波長520nmの緑色発光を示し、発光出力は4mWであり、発光スペクトルの半値幅は、40nmであった。

#### 【0203】実施例18

活性層および第1のp型クラッド層の形成以外は実施例3と同じ操作を行ってLED素子を得た。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、第1のn型クラッド層上に井戸層としてノンドープIn<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nを25オングストロームの厚さに成長させ、その上に障壁層としてノンドープIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nを50オングストロームの厚さに成長させるという操作を13回繰り返し、最後に井戸層としてノンドープIn<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nを25オングストロームの厚さに成長させ、総厚1000オングストロームの多重量子井戸構造の活性層を形成した。また、第1のp型クラッド層として、Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nを500オングストロームの厚さに成長させた。こうして得られたウエーハについて実施例9と同様の処理を行って所望のLED素子を得た。このLED素子は、しきい値電流密度1.0kA/cm<sup>2</sup>で415nmのレーザ発振を示した。

#### 【0204】実施例19

活性層の形成以外は実施例3と同じ操作を行ってLED素子を得た。すなわち、本実施例では、活性層を形成するために、第1のn型クラッド層上に井戸層としてノンドープIn<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nを25オングストロームの厚さに成長させ、その上に障壁層としてノンドープIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>Nを50オングストロームの厚さに成長させるという操作を26回繰り返し、最後に井戸層としてノンドープIn<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nを25オングストロームの厚さに成長させ、総厚1975オングストロームの多重量子井戸構造の活性層を形成した。こうして得られたウエーハについて実施例9と同様の処理を行って所望のLED素子を得た。このLED素子は、室温、しきい値電流密度1.0kA/cm<sup>2</sup>で415nmのレーザ発振を示した。

#### 【0205】実施例20

実施例16で得た青色LED素子と、実施例17で得た緑色LED素子と、従来のGaAs系材料またはAlInGaP系の材料よりなる発光出力3mW、660nmの赤色LEDとのそれぞれ一個づつを1ドットとする256×256画素のフルカラーLEDディスプレイを作製したところ、その白色の面輝度は1万cdであり、しかも色再現領域はテレビよりも広がった。

#### 【0206】

【発明の効果】以上詳述したように、本発明によれば、発光出力が高く、発光スペクトルの半値幅が狭い窒化物半導体発光素子が提供される。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図2】本発明の第1の側面による窒化物半導体発光素子の他の形態の構造を示す概略断面図。

【図3】本発明の第2の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図4】本発明の第2の側面による窒化物半導体発光素子の他の形態の構造を示す概略断面図。

【図5】本発明の第3の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図6】本発明の第3の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図7】本発明の窒化物半導体レーザ素子の構造の一例を示す斜視図。

【図8】本発明の窒化物半導体レーザ素子の他の構造を示す概略断面図。

【図9】本発明の第4の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図10】本発明の第5の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図11】本発明の第6の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図12】本発明の第8の側面による窒化物半導体発光素子の一形態の構造を示す概略断面図。

【図13】本発明の窒化物半導体発光素子における活性層の井戸層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【図14】本発明の窒化物半導体発光素子における活性層の障壁層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

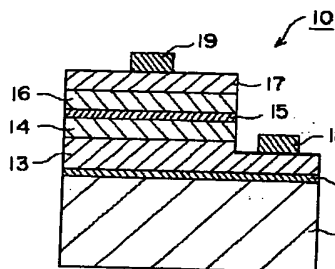
【図15】本発明の窒化物半導体発光素子におけるp型AlGaInクラッド層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

【図16】本発明の窒化物半導体発光素子におけるn型InGaInクラッド層の厚さと発光素子の発光出力との関係を示すグラフ図。

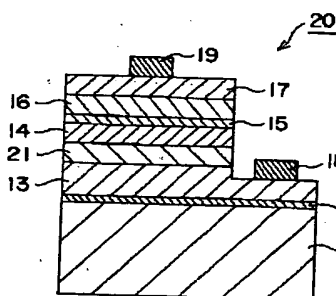
【符号の説明】

11, 91, 401…基板  
13, 93, 403…n型コンタクト層  
14, 21, 34, 54, 501, 94, 294, 294a, 294b, 414, 412…n型クラッド層  
15, 95, 405…活性層  
16, 36, 41, 56, 502, 96, 96a, 96b, 296, 416, 426, 436…p型クラッド層  
17, 97, 407…p型コンタクト層  
18, 98, 408…負電極  
19, 99, 409…正電極

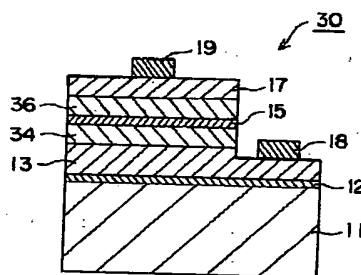
【図1】



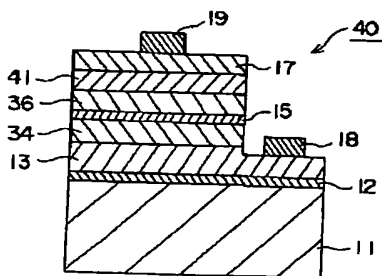
【図2】



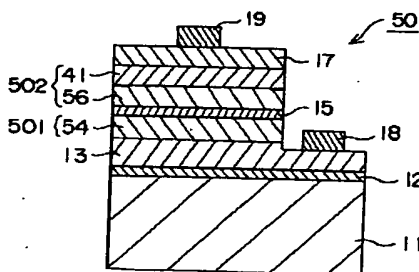
【図3】



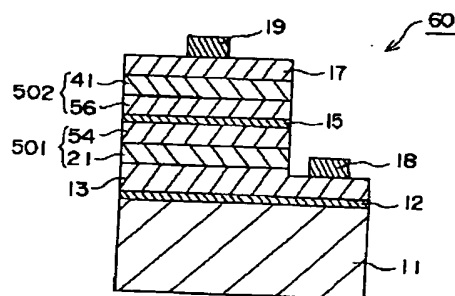
【図4】



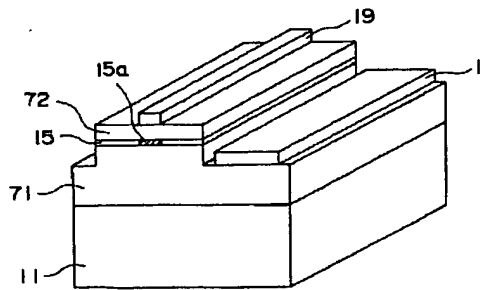
【図5】



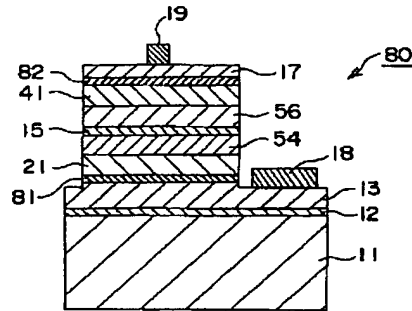
【図6】



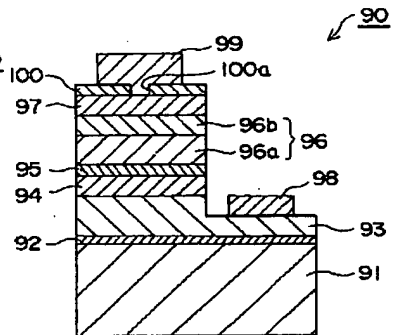
【図7】



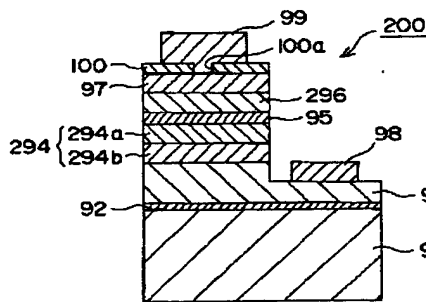
【図8】



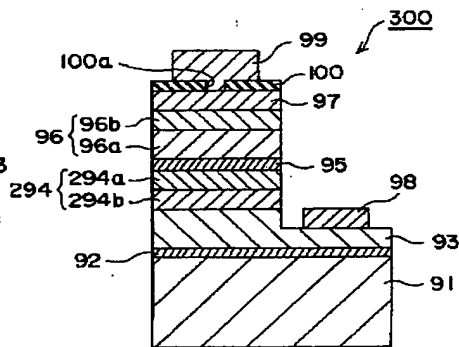
【図9】



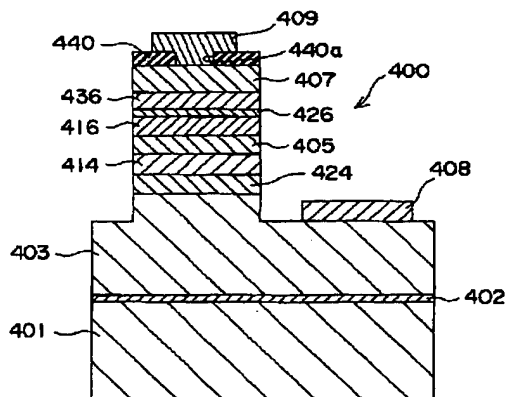
【図10】



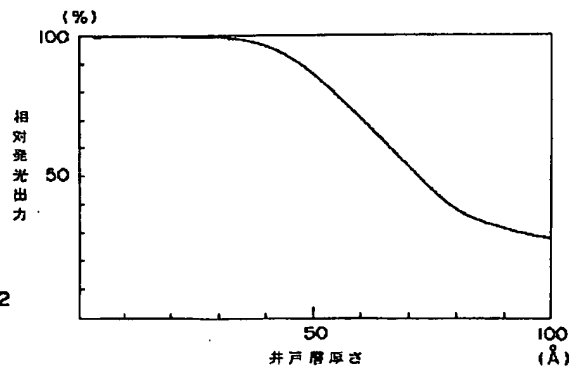
【図11】



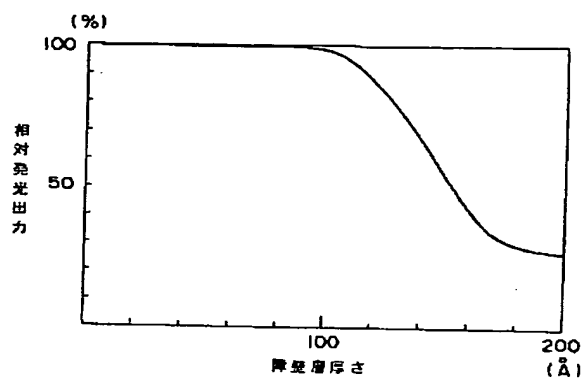
【図12】



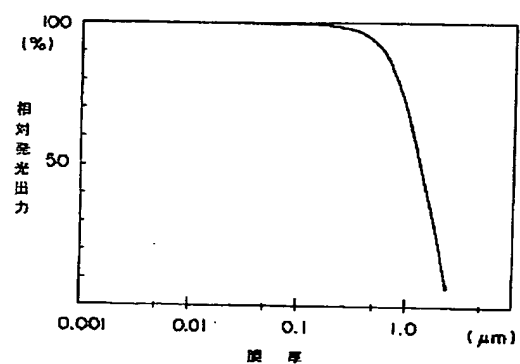
【図13】



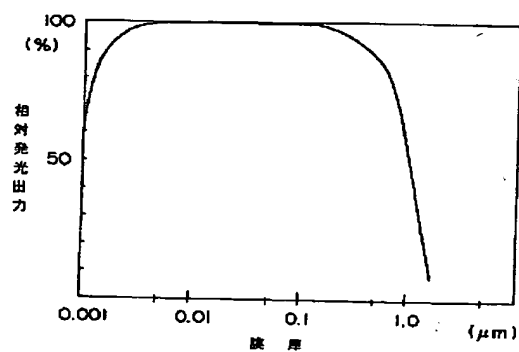
【図14】



【図15】



【図16】



フロントページの続き

(31)優先権主張番号 特願平7-118046  
 (32)優先日 平7(1995)5月17日  
 (33)優先権主張国 日本(JP)

(72)発明者 清久 裕之  
 徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化学工業株式会社内